

c. 如果客户反馈纸卷夹不紧、掉包等问题，检测过
载阀压力，操作夹紧阀杆，观察压力表压力值是否正常，正
常压力值范围 14-15MPa，若不正常进行校正。如果在正常
范围内，客户要求调高压力值，调压值绝对不能超过主安全
阀的压力值，用扳手松开过载阀锁紧螺母，用内六角调整调
节螺钉，顺时针调大，逆时针调小，调整好用扳手拧紧锁紧
螺母^[3]

② B 系列 2-3.8 吨齿轮泵轴头磨损或断轴液压方面的分
析判断方法

a. 客户反馈问题后，现场先观察多路阀主安全阀铅封
是否完好。若完好，不需要测系统压力；若破坏，需要测系
统压力，2-3.5 吨系统压力范围 17.5-18MPa，3.8 吨系统压
力范围 19.5-20MPa，超出压力范围，证明客户私自调压，
要指导客户校正压力值范围；

b. 连接压力表进行测压，压力表规格最好选 40-
60MPa；

c. 如果客户反馈纸卷夹不紧、掉包等问题，检测过
载阀压力，操作夹紧阀杆，观察压力表压力值是否正常，正
常压力值范围 14-15MPa，若不正常进行校正。如果在正常
范围内，客户要求调高压力值，调压值绝对不能超过主安全
阀的压力值，用扳手松开过载阀锁紧螺母，用内六角调整调
节螺钉，顺时针调大，逆时针调小，调整好用扳手拧紧锁紧
螺母^[4]。

第二，针对 WS1 发动机 PTO 口内花键齿硬度低问题
与供应商合作开发 WS1 发动机 PTO 口高硬度齿轮，用于
WS1 原装齿轮的更换替代。

第三，针对 QC/XC PTO 口内花键与液压泵安装止口同
轴度相对久保田略低问题，项目组综合研判如下：

（1）从市场调研的数据分析，齿轮泵轴头磨损或断轴

主要是用户调高系统压力所致，Φ 0.15mm 同轴度导致的故
障较少；

（2）将同轴度从 Φ0.15mm 提高到 Φ 0.025mm，发动
机的结构和工艺工装要进行很大变动，发动机成本增加较
多，性价比不高。

综上，项目组建议从严控制发动机 PTO 口 SAE 渐开线
内花键与液压泵安装止口的同轴度≤Φ0.15mm；液压泵安
装面与内花键轴线垂直度≤0.2mm。

4 效果验证

攻关前：1-3.8 吨内燃叉车齿轮泵轴头磨损及断轴问题
5 台（故障率 PPM1640）

攻关后：故障率降至 560PPM

攻关前后	故障台数	PPM
攻关前	51	1640
攻关后	14	560

5 结语

叉车液压系统，齿轮泵轴头无论是磨损还是断裂，都
会对整车的使用产生重要影响，客户体验感差，影响品牌形
象，要完全避免和消除磨损和断轴不可能也不现实，但是正
确认识断轴和磨损的危害和产生的原因，在设计液压传动系
统时尽可能采取有效技术手段加以防范，在维修保养时不随
意调整压力，尽量减少断轴和磨损并将其可能造成的危害降
低到最低是完全可能的。

参考文献

[1] 何兴存.液压元件[M].北京:机械工业出版社,1985.
[2] 雷天觉.新编液压工程手册[M].北京:北京理工大学出版社,1999.
[3] 左健民.液压与气压传动[M].北京:机械工业出版社,2000.
[4] 李芝.液压传动[M].北京:机械工业出版社,2002.

Analysis and Application of Quantitative Ultrasonic Detection Technology for Railway Passenger Car Wheelsets

Qian Liu

Lanzhou Vehicle Depot, Lanzhou Bureau Group Co., Ltd. of China Railway, Lanzhou, Gansu, 730030, China

Abstract

This paper systematically analyzes the current situation and application prospects of ultrasonic detection quantitative technology for railway passenger car wheelsets. It focuses on discussing the commonly used technical methods, technical difficulties and solutions in the process of ultrasonic detection principle in the quantitative detection of railway passenger car wheelsets. It also analyzes the limitations of the existing quantitative process methods and conducts a large number of experiments in combination with the actual situation in practical work. Based on the experimental data, practical and effective quantitative techniques were summarized. Then, some practical verification of this technique was carried out through natural defects to ensure its rationality and effectiveness in practical application. Through comparison, it was confirmed that this technique can play an important role in the ultrasonic detection of railway passenger car wheelsets.

Keywords

Crack Ultrasonic detection quantification; Phased array detection Time difference of diffraction method Artificial intelligence diagnosis

铁路客车轮对超声波检测定量技术分析与应 用

柳倩

中国铁路兰州局集团有限公司兰州车辆段, 中国 · 甘肃省 兰州 730030

摘 要

本文系统分析了铁路客车轮对超声波检测定量技术的现状和应用前景, 重点讨论了超声波检测原理在铁路客车轮对检测定量过程中常用的技术方法、技术难点及解决方案, 对现有工艺方法定量的局限性进行了分析, 结合实际工作中的现实状态, 进行了大量的试验, 通过实验数据总结出实用有效的定量技术, 再通过自然缺陷对该技术进行了部分实际验证, 确保该技术的合理性和实际应用的有效性, 通过对比, 确认了该技术能够在铁路客车轮对超声波检测中发挥重要作用。

关键词

裂纹; 超声波检测定量; 相控阵检测; 衍射时差法; 人工智能诊断

1 问题背景

在铁路客车的轮对超声波检测中, 由于车轴受到交变载荷的作用, 在压装部位受到弯曲应力和剪切应力, 甚至扭转应力, 导致在车轴上易出现疲劳裂纹, 而疲劳裂纹的出现, 将极大提高车轴的断裂风险, 为铁路运输安全埋下重大隐患。目前对轮对车轴的超声波检测, 是采用常规超声横波利用裂纹位置的端角反射进行检测, 受到车轴表面曲界面的影响, 常规理论上, 对裂纹的深度和长度的判定, 必定存在较大的误差。而准确评价裂纹的长度及深度, 是对车轴寿命评估的最重要基础数据, 因此如何简单高效准确的对缺陷定量评定, 显得尤为重要。

2 误差的原因分析

疲劳裂纹的形成过程, 主要分为三个阶段: 裂纹萌生、稳定扩展、失稳扩展。具有突发性、高度局部性和对缺陷的敏感性特点。而车轴疲劳裂纹的检测, 主要是针对裂纹的萌生期和稳定扩展期。通过理论分析和大量过去车轴冷切的案例, 车轴的疲劳裂纹主要发生在轮座镶入部内外侧位置附近。从车轴的结构形式上看, 在单侧车轴的质量具有非对称性, 导致此类裂纹在萌生和初始扩展时, 并不与车轴表面垂直, 而是具有一个倾角, 这使得理论上的端角反射与实际裂纹的反射情况存在定量上的差异。

以试块为基础的裂纹定量存在三方面的问题, 一是试块的线切割人工缺陷是两侧分离的, 而真实的自然裂纹, 初始时, 两侧是秘贴的, 这将导致中间的分离层很薄, 这使得声压反射率在此限度下, 将有较大的降低, 传统方式下, 以回波高度为基础的定量方法明显将存在偏差。二是裂纹形态

【作者简介】柳倩 (1991-), 女, 中国甘肃平凉人, 本科, 助理工程师, 从事建筑环境与设备工程研究。

问题，在试块上加工的人工缺陷，是按弓形加工的，这在小尺度下（15mm 以下）与自然裂纹是相类似的，但实际的裂纹，由于车轴的转动，其自然裂纹往往是浅而长的，在发现的自然裂纹中，最大深度 1mm 左右的裂纹，其长度往往超过 130mm，这就是说自然裂纹在形态上，与人工模拟的缺陷存在较大的差异性。三是裂纹表面状态问题，裂纹在疲劳源区和扩展区，存在贝壳状辉纹条带状花样，初始开裂时，表面不平整，与试块上的人工缺陷存在明显的不同。

车轴截面为圆形，其裂纹反射为曲面端角反射，与平面端角反射的指向性存在差异，这种曲面反射的发散与聚焦，与声源尺寸、频率、曲率都存在联系，导致理论上的近似计算方法与实际情况存在差异。

3 可行性方法分析

基于对定量误差产生的原因的分析，从声场理论上，超声波遇到轮对车轴上裂纹时发生的散射现象，是发现缺陷和定量的物理基础。波动方程的基本形式为：

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 \Psi$$

而散射场可理解为总声场与入射场的差，即：

$$\Psi_s(r) = \Psi_{total}(r) - \Psi_{inc}(r)$$

在远声场分析上，这些理论相对较为成熟，目前超声采用的方法，都可归结到该理论，尤其是目前最常用到的脉冲反射法。此方法的优点在于操作方便、成本低、可靠性好。缺点在于数学模型相对简单，利用了连续简谐波通过傅里叶变化模拟了实际的脉冲波。为了应用方便，在数学处理上，也利用泰勒级数（Taylor series）和麦克劳林公式（Maclaurin formula）进行了近似，导致与检测结果与实际误差较大。而在近声场的分析上，由于受到干涉的影响，理论上更为复杂，与实际的偏差也更大，相关的研究在一些声场仿真软件中有应用，但技术不成熟。目前在近场附近的缺陷探伤，主要靠距离-波幅曲线评定，人为影响较大。

为了减小误差，近似模型主要有基尔霍夫（Kirchhoff）近似（高频近似，即 PAUT 技术）和玻恩（Born）近似（弱散射近似，即 TOFD 技术），其中，Kirchhoff 近似适用于尺寸大于波长的裂纹类缺陷，且计算效率高，适用于开放型缺陷，但无法处理几何边界散射；而 Born 近似适合于内部缺陷的情形，对车轴疲劳裂纹的情况并不适用。在实际运用中，又需要考虑到曲面散射修正（可以考虑利用聚焦方式）和晶粒散射噪声抑制（可采用小波包阈值降噪）。

前沿研究的突破方向主要集中在四个方面：一是利用全波反演理论（Full Waveform Inversion）建立非线性优化，以实现缺陷参数的像素级重构，可以达到较高的分辨率。二是时域有限差分法（FDTD）仿真建模真实的微观结构（含氧化层、残余应力等）。三是利用 U-Net 架构直接建立散射

模型，建立缺陷参数的映射。四是利用人工智能按已知数据训机，达到自动定量识别的目的。这些方法目前在实际应用中，仍然存在复杂度高、成本高、稳定性差、对现场环境和检验条件要求较高等问题，目前仍处于实验验证阶段。

4 基于实践基础的实验

通过上述的理论分析，可以看出，轮对超声波检测的定量技术从理论上，依然处于不断地探索和试验的阶段，到目前为止，仍无法实现简便、准确、稳定的解决方案。相控阵技术、时差衍射法虽然发展很快，但实际使用中，仍存在成本、精度等诸多问题，为此，需要在实践的基础上，摸索出实用的方法，需要新的思考，主要基于两点考虑：

利用裂纹尖端衍射波，确定裂纹深度。借鉴衍射时差法，仅利用尖端衍射波与裂纹根部回波时差进行测量的方法。该方法避开了裂纹取向、表面状态、裂纹间隙等对定量的影响，可直接测量裂纹的垂向深度。但考虑到裂纹的尖端衍射波声压较小，同时，从声波入射看，收到界面形状的影响，声波进入车轴后，呈发散状态，进一步增加了接受难度（图 1）。为此需要根据车轴的尺寸，设计合适的聚焦探头，同时考虑到裂纹萌生期和初始稳定扩展期深度较浅，设计焦距深度 $D_F=180\text{mm}$ ，有利于接收尖端衍射波，探头形式如图 2 所示。

此时探头轴线上的声压可表达为：

$$P = \frac{2P_0 \sin \left[\frac{\pi N}{2x} \left(1 - \frac{x}{F} \right) \right]}{1 - \frac{x}{F}}$$

此时，缺陷深度可简单按下式求出： $d = (c \cdot t_1 - c \cdot t_2) \cos \beta = c \cdot \Delta t \cdot \cos \beta$ ，原理图如图 3 所示。

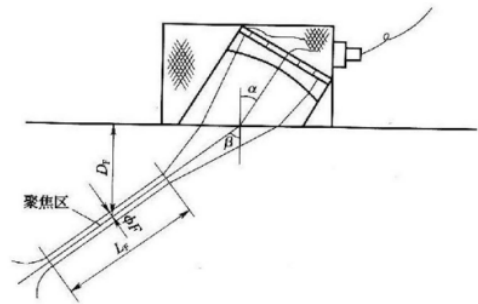


图 1

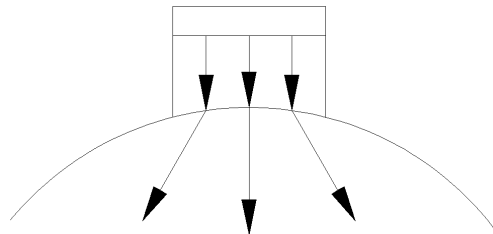


图 2